

Elektrische Regelantriebe für den Maschinenbau

and der Technik und Entwicklungsrichtungen

von Werner Leonhard, Braunschweig

Der Beitrag gibt einen Überblick über den gegenwärtigen Stand und die Entwicklungsrichtungen bei geregelten elektrischen Antrieben. Dabei wird deutlich, daß sich durch die Kombination von Leistungselektronik und Mikroelektronik neue Möglichkeiten bieten, um dem einfachen und robusten Drehstrommotor die neue Zukunft als energiesparender Regelantrieb zu erschließen. Der Einsatz von Mikrorechnern wird zu flexiblen und hinsichtlich ihrer Funktion wesentlich erweiterten Lösungen bei Mehrgrößensystemen und nichtlinearen Regelstrecken führen; Meßgrößerekonstruktion, Entkopplung durch Koordinatentransformation, Adaption, Optimierung und selbstneustellende Regelung sind mit Mikrorechnern erreichbare Ziele.

Einleitung

Die vielfältigen Antriebsaufgaben, die sich auf die Grundstoff- und Verarbeitungsindustrie, die Versorgung und den unbegrenzten Verkehr beziehen, werden heute überwiegend mittels elektro-mechanischer Energiewandler gelöst. Dies gilt für einfache Arbeitsmaschinen, wie Pumpen und Ventilatoren, ebenso wie für Präzisions-Regelantriebe bei Satellitennantennen. In vielen Fällen hat sich der Übergang zu verteilten elektrischen Antrieben und der damit mögliche Wegfall mechanischer Übertragungsglieder dem Konstrukteur jenes Maß an Flexibilität vermittelt, das ihn zur Entwicklung komplexer Fertigungseinrichtungen mit vielen Bewegungsachsen, moderner verfahrenstechnischer Produktionsanlagen oder großer Erdbewegungsvorrichtungen für den Tage-Bergbau befähigt. Ursache für das Vordringen elektrischer Antriebe sind ihre besonders günstigen konstruktiven und betrieblichen Eigenschaften, die sich stichwortartig wie folgt anzeichnen lassen:

Praktisch unbegrenzter Leistungsbereich und Drehzahlbereich, motorischer und generatorischer Betrieb in allen Quadranten der Drehzahl-Drehmoment-Ebene, Nutzbrem-sung, konstruktive Flexibilität, mit Sonderbauformen auch translatorische Bewegung beherrschbar, Gleichförmigkeit des Drehmoments, ruhiger Lauf, geringe Geräuschentwicklung,

- hohe kurzzeitige Überlastbarkeit,
- niedrige Verluste, offener oder geschlossener Kühlkreislauf,
- sofortige Betriebsbereitschaft, kein Warmlauf, geringer Wartungsbedarf,
- keine feuergefährlichen Betriebsstoffe, keine Abgase,
- lange Lebensdauer, da keine hohen Betriebstemperaturen,
- einfache Konstruktion infolge einer minimalen Anzahl bewegter Teile.

Eine besondere Bedeutung für viele Anwendungen hat die Tatsache, daß

- eine reaktionsschnelle elektronische Steuerung und Regelung in der gesamten Drehzahl-Drehmoment-Ebene einschließlich des Stillstands möglich ist; die damit zusammenhängenden Fragen sollen im folgenden behandelt werden.

Kein anderer Typ von Antriebsmaschine weist eine vergleichbare Liste nützlicher Eigenschaften auf. Dennoch sind auch Gesichtspunkte zu nennen, die den Einsatz elektrischer Antriebsmotoren erschweren oder sogar verhindern können: Diese betreffen die

- Notwendigkeit einer elektrischen Leistungszufuhr, da die heute verfügbaren Energiespeicher hinsichtlich Speicherkapazität, Gewicht (Masse), Lebensdauer und Kosten meist unbefriedigend sind, ein Mangel, der bisher die Entwicklung elektrischer Straßenfahrzeuge als allgemeines Verkehrsmittel verhindert hat, und das
- leistungsbezogene Eigengewicht und Bauvolumen des aktiven Teils, die wegen der Eisensättigung größer als bei hydraulischen Hochdruckantrieben sind.

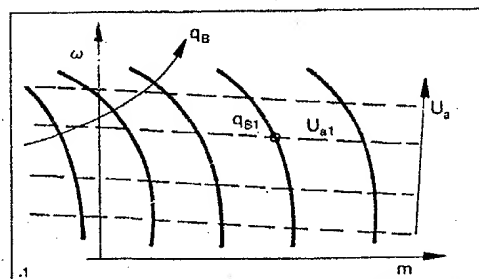


Bild 1. Kennlinien eines Motorenprüfstands.

—	Verbrennungsmotor
- - -	elektrische Belastungsmaschine
ω	Winkelgeschwindigkeit
m	Drehmoment
q_B	Brennstoff-Durchfluß
U_a	Ankerspannung

Sofern diese Randbedingungen keine betriebliche Einschränkung bedeuten, was bei ortsfesten Anlagen und spurgeführten Fahrzeugen meistens der Fall ist, bieten elektromechanische Wandler fast immer die günstigste Lösung. Elektrische Regelantriebe wurden damit eine Voraussetzung aller Fortschritte in der Produktionstechnik und der industriellen Automatisierung [1 bis 6].

2 Aufgabenstellung

2.1 Dynamische Struktur von Antriebsregelstrecken

Bei Regelantrieben können als Regelgrößen, die konstanten oder veränderlichen Führungswerten folgen sollen, verschiedene Variable dienen:

- Drehmoment (Strom), Kraft,
- Beschleunigung,
- Drehzahl oder Drehzahlverhältnis,
- Drehwinkel, Lage,
- Leistung.

Die zu regelnden Größen können in Abhängigkeit vom Betriebszustand wechseln, wie das Beispiel eines Aufzugsantriebs zeigt, bei dem absatzweise die Beschleunigung, die Geschwindigkeit und die Lage der Kabine vorgegebene Werte annehmen sollen. In den meisten Fällen sind zum Schutz des Antriebes und der Last Begrenzungen einzuhalten.

Sollen gleichzeitig zwei oder mehrere Größen geregelt werden, muß eine entsprechende Anzahl von Stellgrößen verfügbar sein. Bild 1 zeigt als Beispiel die statischen Kennlinien eines Motorenprüfstands, bei dem ein Verbrennungsmotor mit steuerbarem Treibstoffdurchfluß q_B eine elektrische Belastungsmaschine mit der Ankerspannung U_a als Stellgröße antreibt. Drehzahl und Drehmoment lassen sich damit unabhängig voneinander vorgeben.

Mehrdimensionale Arbeitsmaschinen, etwa Montage- oder Gießereikräne, Werkzeugmaschinen oder Roboter, erhalten für jede Bewegungsachse einen unabhängigen Antrieb, der mehrere Motoren umfassen kann. Die zu steuernde Bewegung eines Werkstücks oder Werkzeugs vollzieht sich in beliebigen, zum Beispiel in rechtwinkligen Koordinaten oder Zylinderkoordinaten.

Große Produktionsanlagen erfordern eine genau dosierte Zufuhr mechanischer Leistung an verschiedenen Stellen der Anlage; Antrieb und Regelung hängen

Elektrische Regelantriebe für den Maschinenbau

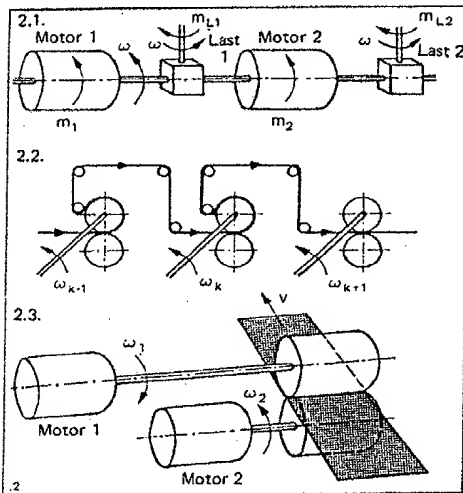


Bild 2. Mehrmotorenantriebe.

Bild 2.1. Mehrfarben-Rotations-Druckmaschine (Antrieb).

Bild 2.2. Trockenteil einer Papiermaschine.

Bild 2.3. Zwillingsantrieb eines Reversier-Walzwerks.

v Walzgeschwindigkeit

gen dabei vom Grad der Kopplung über die Arbeitsmaschine ab. Bild 2.1 zeigt als Beispiel das Antriebsschema einer Rotationsdruckmaschine mit mehreren mechanisch verbundenen Druckwerken. Um die von der Längswelle zu übertragenden Drehmomente und damit die Verdrehung der Druckzylinder gegen die Papierbahn klein zu halten, geschieht der Antrieb an mehreren Stellen. Zwar genügt dann ein einziger Drehzahlregler, jedoch muß jeder Motor einen Drehmomentregler erhalten, um eine bestimmte Drehmomentaufteilung zu erzielen. Ein Vorzeichenwechsel des Drehmoments ist möglichst zu vermeiden, da er wegen der stets vorhandenen Lose in den Getrieben zu undefinierten Winkelfehlern führen würde.

In Bild 2.2 ist als Gegenbeispiel der Antrieb aufeinanderfolgender Trockenrollen einer Papiermaschine skizziert. Die Kopplung geschieht hier über die feuchte Papierbahn, die nur eine geringe Zugfestigkeit hat, andererseits wegen der Gefahr der Faltenbildung aber straff gehalten werden muß. Die Aufgabe läßt sich durch eine genaue Drehzahl- oder Winkelregelung der Teilantriebe lösen, indem die Sollwertvorgabe eine kleine Voreilung des jeweiligen Folgeantriebs sicherstellt.

Zwischen den Grenzfällen der quasi-starren und der schwachen Kopplung benachbarter Antriebe gibt es alle denkbaren Zwischenstufen. Während bei mehrgerüstigen Kaltwalzwerken mit hohem Bahnzug und starker Kopplung gefahren wird, müssen kontinuierliche Warmbandstraßen fast zugfrei arbeiten. Als weiteres Beispiel ist in Bild 2.3 der Zwillingsantrieb eines Reversierwalzwerks gezeichnet; Ober- und Unterwalze werden dabei getrennt angetrieben, die Kopplung der beiden Walzen geschieht nur über Reibungskräfte. Anlaß für diese Konstruktion ist die Aufteilung der Antriebsleistung auf mehrere Motoren; auch betriebliche Gesichtspunkte, die zum Beispiel leicht unterschiedliche Drehzahlen zur Beeinflussung des Walzvorgangs betreffen, können eine Rolle spielen. Alle diese Aufgaben lassen sich bei geeigneter Ausführung der Antriebsregelung beherrschen.

Bei Antriebsmaschinen mit „steifer“, also im allgemeinen auch schwerer, Konstruktion sind die internen Torsionswinkel als vernachlässigbar anzunehmen, so daß alle bewegten Massen sich zu einem – zum Beispiel auf die Antriebswelle – umgerechneten Ersatzträgheitsmoment Θ vereinigen lassen. Damit erhält man

das in Bild 3 erfaßte dynamische Blockschaltbild eines mechanischen Systems mit den durch Integration auseinander hervorgehenden Variablen

- Winkelbeschleunigung $\ddot{\epsilon} = \alpha$,
- Winkelgeschwindigkeit $\dot{\epsilon} = \omega$,
- Winkel ϵ

oder entsprechenden translatorischen Größen. Die in den doppelt umrandeten Blöcken angedeutete Bildung der Drehmomente (einschließlich der Reibungsdrehmomente) wird durch weitere, im allgemeinen nichtlineare Differentialgleichungen beschrieben; y_a und y_L sind die zugehörigen Stellgrößen. Schließlich kann es bei Transportvorgängen oder schwingungsfähigen mechanischen Systemen notwendig sein, als weitere nur stetig veränderbare Zustandsgröße die Beschleunigung einzuführen und den

- Ruck $\ddot{\epsilon} = \alpha$

auf bestimmte Maximalwerte zu begrenzen. Dies wird noch in einem späteren Beispiel gezeigt.

Die Regelung wird wesentlich erschwert, wenn eine Zusammenfassung der Teilmassen wegen der Elastizität mechanischer Übertragungsglieder, zum Beispiel flexibler Wellen, Getriebe oder Kupplungen, nicht zulässig ist, wie in Bild 4 am Beispiel eines Zwei-Massen-Systems gezeigt [7; 8]. Weitere Komplikationen entstehen durch Lose in den mechanischen Übertragungsgliedern infolge von Verschleiß oder ungenauer Bearbeitung; dies ist in Bild 4 durch einen nichtlinearen Funktionsblock

$$m_k = f(\epsilon_1 - \epsilon_2)$$

mit dem Unempfindlichkeitsbereich Δ angedeutet. Die Lose wird bei Drehmo-

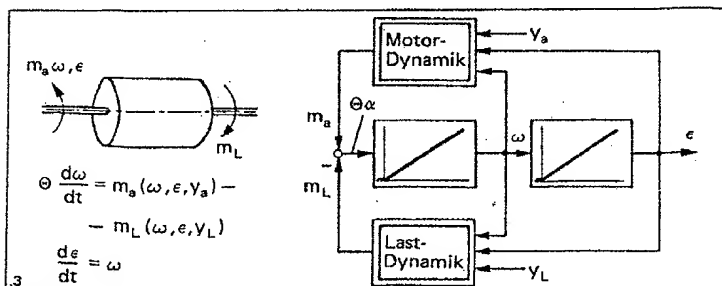


Bild 3. Antrieb mit konzentrierter Masse.

m_a Drehmoment (Antrieb)

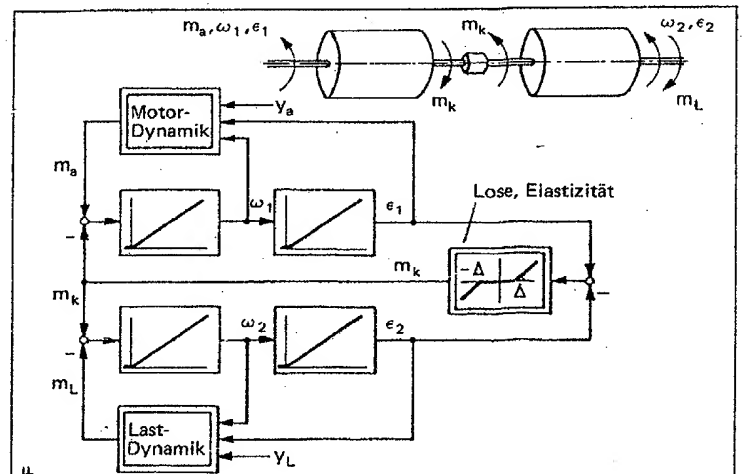
m_L Drehmoment (Last)

t Zeit

y_a, y_L Stellgrößen

Bild 4. Antrieb mit zwei elastisch gekoppelten Massen.

m_k Kupplungs-Drehmoment



mentumkehr wirksam und kann insbesondere bei einer Lageregelung zu unerwünschten nichtlinearen Schwingungen führen. Da Verschleiß nie völlig auszuschließen ist, verwendet man bei Präzisionsantrieben mechanisch verspannte Getriebe; bei Mehrmotorenantrieben kann die Verspannung über geeignete Drehmomentsollwerte für die Motoren vorgenommen werden.

2.2 Variable Streckenparameter

Die Parameter (Trägheitsmomente, Steifigkeiten und Eigenfrequenzen, Reibungskoeffizienten) sind bei den meisten Arbeitsmaschinen genügend genau konstant, so daß eine feste Reglereinstellung befriedigende Ergebnisse liefert. Es gibt aber auch Fälle, in denen die Parameter sich während des Betriebs erheblich verändern; das Einstellen der Regler muß dann entweder für den ungünstigsten Betriebspunkt geschehen, was zu nichtoptimalem Verhalten an anderen Arbeitspunkten führt, oder die Regler sind während des Betriebes nachzuführen; man kommt damit zu adaptiven Reglern.

Stark veränderliche Regelstreckenparameter sind bei Antrieben mit variabler Geometrie zu beobachten, wie etwa bei

- Fördermaschinen (Seillänge, damit Federsteifigkeit; Lastmasse),
- Haspeln und Wicklern (Bundradius; Trägheitsmoment),
- Zentrifugen (Trägheitsmoment),
- Werkzeugmaschinen und Handhabungsgeräte (Radien, Knickwinkel, Lastmassen; Trägheitsmomente).

In Bild 5 ist als Beispiel die komplizierte dynamische Struktur eines Haspels gezeichnet, mit dem ein Materialband unter Zug aufgewickelt wird. Zur Materialzufuhr dienen Transportwalzen, die als Klemmstelle den Wickelvorgang von der vorausgehenden Verarbeitungsstation entkoppeln. Eine wichtige Regelgröße ist die Zugkraft f , die sich mit dem Elastizitätsmodul E des Materials aus der Materialdehnung beim Wickelvorgang ergibt. Die drei Integratoren beschreiben die Winkelgeschwindigkeit ω , den Bundradius r sowie die Materialmenge zwischen Transportwalzen und Haspel, also die Dicke h des gedehnten Bandes. Wesentliche nichtlineare und veränderliche Funktionen sind das Trägheitsmoment $\Theta(r)$ sowie das Biege- und Reibmoment m_B , das von der Drehzahl, dem Bundradius und den Materialeigenschaften abhängt. Man erkennt, daß dem Bundra-

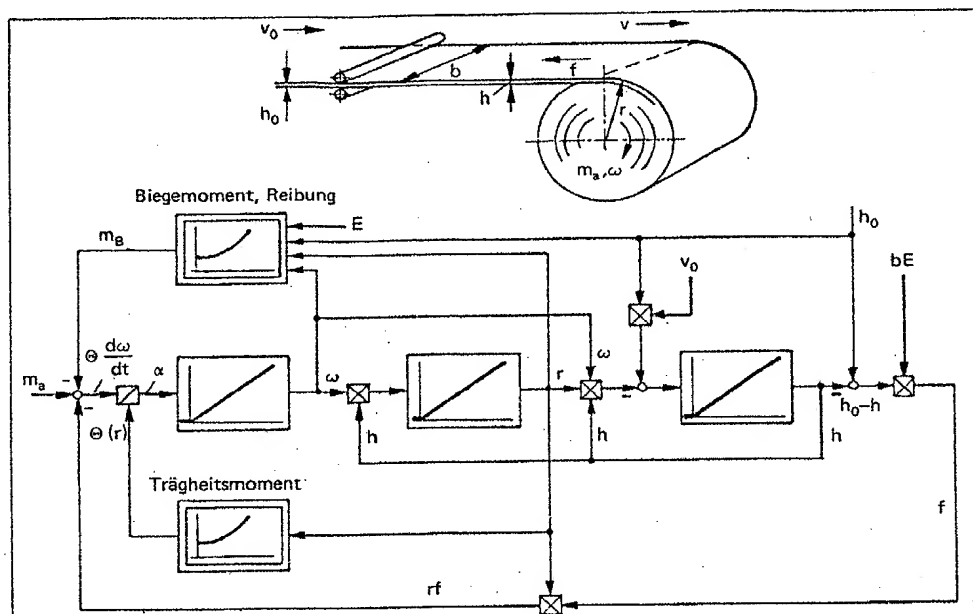


Bild 5. Blockschaltbild eines Haspelantriebs.

b	Bandbreite
h_0	Dicke des zugeführten Bandes
v_0	Geschwindigkeit des zugeführten Bandes

v	Umfangsgeschwindigkeit des Bundes
r	Bundradius
f	Bandzugkraft
E	Elastizitätsmodul des Bandes

dius reine zentrale Bedeutung zukommt; eine Regelung zum Beispiel der Zugkraft f sollte zweckmäßigerweise mit der direkten oder indirekten Erfassung dieser Größe beginnen [9; 10].

2.3 Analoge und digitale Regelverfahren

Große Unterschiede bestehen hinsichtlich der geforderten Genauigkeit von Regelantrieben. Sie reichen von einfachen Drehzahlregelungen mit 1% Fehler bis zu Präzisionsantrieben für zum Bei-

- Werkzeugmaschinen mit 10^{-2} mm Lagefehler bei einem Verstellweg von 10^3 mm, was einem relativen Fehler von 10^{-5} entspricht,
- Satellitenantennen, Fehler 10^{-3} Grad bei 500 Grad Stellbereich, relativer Fehler $2 \cdot 10^{-6}$,
- Papiermaschinen mit Drehzahlregelung, zulässige Drehzahlabweichung im Dauerbetrieb $10^{-4}/24$ h.

Für einfache Regelungen benutzt man heute überwiegend analog arbeitende Geräte, jedoch kann es bei höherer Genauigkeit notwendig sein, digitale Verfahren zu verwenden, um Abbildungsfehler und Drifteffekte bei Meßgebern und Regelverstärkern zu vermeiden. Die stationäre Genauigkeit ist dann aus-

schließlich durch die Meßgeber und Analog-Digital-Umsetzer bedingt. Besonders genaue Meßverfahren gibt es für Lage, Zeit und Geschwindigkeit (Frequenz) sowie daraus abzuleitende Größen. Gleichzeitig bietet eine digitale Signalverarbeitung die Möglichkeit einer rechnergestützten Aufbereitung der Führungsgrößen und Meßwerte, was zum Beispiel bei Werkzeugmaschinen große Bedeutung erlangt hat.

Digitale Verfahren waren früher mit dem Nachteil hoher Gerätekosten behaftet. Seitdem aber leistungsfähige und kompakte Mikrorechner kostengünstig verfügbar sind, tritt dieser Gesichtspunkt zunehmend in den Hintergrund. Damit werden auch adaptive und optimierende Regelstrategien, die ein hohes Maß an interner Signalverarbeitung erfordern, mit geringem Geräteaufwand praktikabel. Dies führt zwar zu einer Verlagerung des Aufwands auf den programmiertechnischen Bereich („software statt hardware“), jedoch ist hier wegen der großen Flexibilität eine „Standardisierung durch Verallgemeinerung“ auf einfachere Weise möglich. Es ist deshalb zu erwarten, daß man künftig auch in solchen Fällen digitale Regelverfahren einsetzen wird, wo es weder aus Gründen der Genauigkeit noch der umfangreichen Signalverarbeitung notwendig wäre [11].

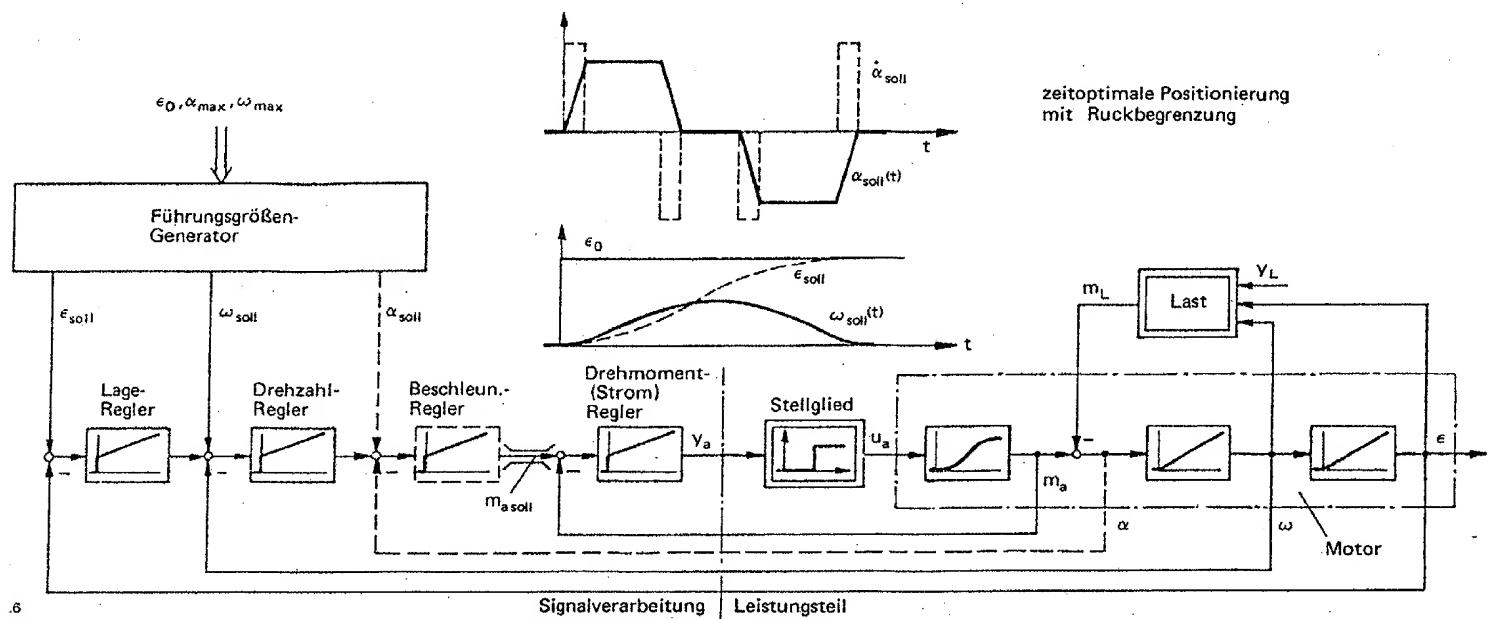


Bild 6. Lageregelung mit Drehzahl- und Beschleunigungsvorsteuerung.

2.4 Prinzip einer Kaskadenregelung

Wegen des bei allen Antriebsregelstrecken ähnlichen Grundaufbaues (Bild 3 und 4) und der häufig mit dem Betriebszustand wechselnden Randbedingungen hat sich für Antriebsregelungen eine hierarchische Mehrebenen-Struktur eingeführt und allgemein durchgesetzt [12]. **Bild 6** zeigt das Schema einer mehrschleifigen Kaskadenregelung, wie sie zum Beispiel für jede Achse einer bahngeregelten Werkzeugmaschine notwendig ist; sie umfaßt vier ineinander verschachtelte Regelkreise für

- Drehmoment (Strom),
- Beschleunigung,
- Drehzahl,
- Lage,

entsprechend der in der Regelstrecke enthaltenen Integratorkette. Jeder Regler erhält seine Führungsgröße von der nächsthöheren Regelebene, wobei die Regelgeschwindigkeit nach innen zunimmt; auftretende Störgrößen werden somit schnell und auf kürzestem Wege ausgeglichen. Da der Sollwert jedes inneren Reglers elektronisch begrenzenbar ist, paßt sich die Regelstruktur selbsttätig veränderten Bedingungen an, weil beim Auftreten einer Übersteuerung die weiter außen liegenden Regelschleifen abgekoppelt werden: So führt zum Beispiel die Übersteuerung des Beschleunigungsreglers auf eine Drehmomentbegrenzung, die zum Schutz des Antriebs und der Last immer erforderlich ist; bei Übersteuerung des Lagereglers ergibt sich in

entsprechender Weise eine Drehzahlbegrenzung. Sobald der Anlaß der Übersteuerung, etwa Überlastung oder eine zu schnelle Sollwertänderung, nicht mehr vorhanden ist, wird in einem stoßfreien Übergang die ursprüngliche Regelstruktur wieder hergestellt. Ein weiterer wichtiger Vorzug betrifft die Tatsache, daß eine schrittweise Inbetriebnahme der Anlage, beginnend mit dem Drehmoment-(Strom-)Regelkreis, der das Leistungsglied umfaßt, möglich ist.

Beim Schema nach Bild 6 ist eine Vorsteuerung der Drehzahl- und Beschleunigungsregler durch parallel zugeführte Sollwerte eingetragen; diese Maßnahme dient zur Reduktion dynamischer Fehler bei Bahnregelbetrieb. Das Sollwert-Tripel

$(\varepsilon, \omega, \alpha)_{\text{sol}}$

wird bei der Arbeitsvorbereitung für jede Achse berechnet und auf einem Datenträger für wiederholten Abruf gespeichert. Eine weitere Möglichkeit, die sich bietet, ist in Bild 6 für den Fall zeitoptimaler Positionierung bei sprungförmig veränderlichen Zielwerten ϵ_0 angedeutet; um einen stetigen Verlauf der Beschleunigung zu erreichen, müssen die zugehörigen Sollwerte von einem Rechengenrät erzeugt werden. Der Darstellung nach Bild 6 entspricht eine Maximallösung; bei einfachen Drehzahlregelungen genügt meistens eine einzige innere Schleife in Form einer Stromregelung.

Während man die Lageregelung aus

Genauigkeitsgründen häufig digital ausführt, arbeiten die inneren Regelschleifen, deren statische Fehler sich nur auf die Begrenzungen auswirken, meistens analog. Wie schon erwähnt, wird sich jedoch in Zukunft die Tendenz verstärken, auch untergeordnete Regelungen in Mikrorechnern zu verwirklichen. Bei der Stromregelung ist allerdings zu berücksichtigen, daß das Leistungsstellglied eine hohe zeitliche Auflösung des Reglers erfordert.

3 Elektrische Stellglieder und regelungstechnische Hilfsmittel

Das besondere Kennzeichen elektromechanischer Energiewandler ist die unmittelbare elektronische Steuerbarkeit. Hierzu dienen die Stellglieder der Leistungselektronik [13; 14] ebenso wie die Komponenten der signalverarbeitenden Elektronik.

3.1 Leistungselektronik

Stromrichter, also elektrische Stellglieder hoher Leistung, enthalten heute ausschließlich Festkörper-Schalt Elemente auf Silizium-Basis, und zwar bis zu einer Leistung von etwa 10 kW in Form schnell-schaltender ($< 10 \mu\text{s}$) Transistoren, darüber bis zu beliebigen Leistungen Thyristoren. Der Grund für die ausschließliche Verwendung des Schaltprinzips ist die Reduktion der Verlustleistung. Dennoch entstehen in den kleinen aktiven Halbleiterzellen mit ihrer geringen Speicherkapazität erhebliche elektri-

sche und thermische Beanspruchungen, was bei der Anwendung beachtet werden muß. Dies gilt vor allem für Transistoren, die wirksam gegen Überlastung geschützt werden müssen. Thyristoren vertragen dagegen eine vergleichsweise starke kurzzeitige Überlastung bis zum 10fachen des zulässigen Dauer-Nennstromes, jedoch sind auch sie empfindlich gegen Überspannungen oder zu schnellen Stromanstieg.

Transistoren und Thyristoren unterscheiden sich vor allem hinsichtlich des anzuwendenden Steuerverfahrens. Während man Transistoren fast beliebig ein- und ausschalten kann, werden Thyristoren durch einen kurzzeitigen Impuls „gezündet“ und beim Nulldurchgang des Laststroms gesperrt; in einer mehrphasigen Schaltung geschieht das Löschen durch Zündung des Folgethyristors. Auch bei Thyristoren liegt der Zündtakt, also die Laufzeit für Steuersignale, im Bereich weniger Millisekunden. Stromrichtergespeiste elektrische Antriebe sind deshalb für reaktionsschnelle Regelungen prädestiniert.

Wegen der schaltenden Funktion des Stromrichters entstehen an den Wicklungen der Motoren stark überschwingungshaltige Spannungen, die zu entsprechenden Verzerrungen bei den Strömen führen und erhöhte Verluste verursachen; bei der Auslegung eines Antriebs ist dies zu berücksichtigen.

Da ein einzelnes Leistungsstellglied

ein binäres Schaltelement verkörpert, läßt sich der Schaltzustand einer Stromrichterschaltung mit n Elementen durch ein n -Bit-Binärwort digital beschreiben; daraus ergeben sich auch Hinweise für den zweckmäßigen Entwurf der Steuer-elektronik.

3.2 Signalverarbeitende Elektronik

Transistoren und Thyristoren mit der zugehörigen Steuerschaltung haben eine hohe Leistungsverstärkung zwischen Steuersignal und Ausgangsgröße, so daß die dem Stellglied vorgelagerte Signalverarbeitung auf sehr niedrigem Leistungsniveau (mW) arbeiten kann. Hierfür steht eine Vielfalt analoger und digitaler Schaltungen zur Verfügung, die heute vorzugsweise in Form integrierter Mikroschaltungen in kleine Silizium-Einkristallscheiben eingebettet und deshalb besonders störsicher und zuverlässig sind. Die funktionsbezogenen Kosten sind in den letzten Jahren ständig gesunken. Beispiele hierfür sind

- Rechenverstärker,
- Analog-Digital- und Digital-Analog-Umsetzer,
- Logische Funktionen,
- Zähler, Schieberegister, Speicherbausteine.

Wegen der besseren Störuneempfindlichkeit, aber auch als Folge der Tatsache, daß das Leistungsstellglied Schaltcharakter hat, dringen digitale Verfahren

auch bei der Signalverarbeitung vor. Es ist möglich, Antriebsregelungen zu entwerfen, bei denen sich die gesamte Signal- und Leistungsumsetzung von den kleinsten bis hin zu den größten Leistungen digital vollzieht [11].

3.3 Mikrorechner

Eine wesentliche Voraussetzung hierfür sind digitale Mikroprozessoren, die auf einem Si-Plättchen mit einer Kantenlänge von rund 5 mm viele Tausend Schalttransistoren enthalten; Prognosen deuten hin, daß in einigen Jahren eine Integrationsdichte von 10^6 Transistoren in einem „Chip“ erreicht sein wird. Das Besondere an diesem erstaunlichen Bauelement ist, daß seine Wirkungsweise nicht mehr vom Hersteller durch die Schaltung, sondern vom Anwender durch das in einen Mikrospeicher eingelesene Programm bestimmt wird. Wie ein üblicher Digitalrechner kann ein Mikroprozessor beliebige programmierbare Abläufe ausführen; gleichzeitig bietet die Funktionsneutralität die Voraussetzung einer kostengünstigen automatisierten Massenfertigung. Der geräte-technische Aufwand eines Mikrorechners, der Mikroprozessor, Speicher und Ein-/Ausgabebausteine enthält und auf einer Platte von Postkartengröße untergebracht werden kann, ist äußerst gering, so daß ein dezentraler Einsatz möglich wird. Somit steht eine im Prinzip unbegrenzte Rechenleistung künftig überall

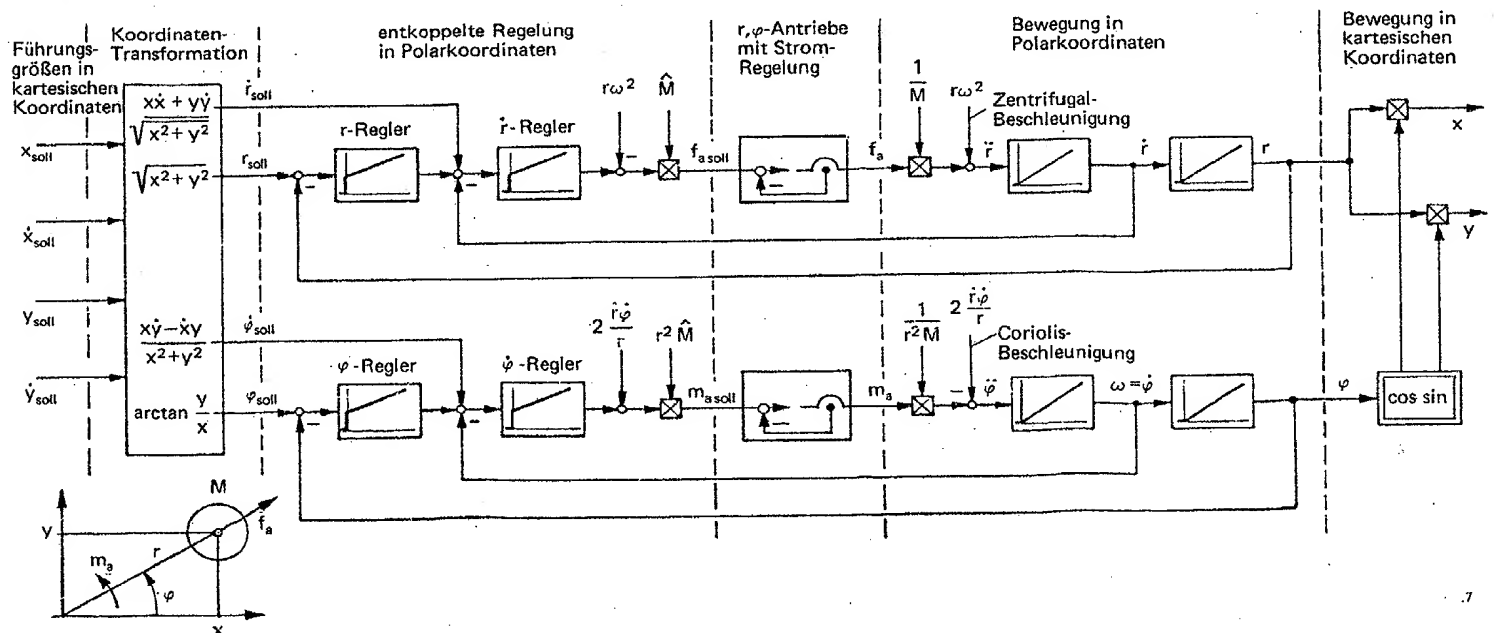


Bild 7. Zweiachsige Bahnregelung in kartesischen Koordinaten unter Verwendung von Stellantrieben in Polarkoordinaten.
 x, y kartesische Koordinaten r, φ Polarkoordinaten

Elektrische Regelantriebe für den Maschinenbau

zur Verfügung, wo sie benötigt wird, um Steuer- und Regelvorgänge effektiver zu gestalten. Das regelungstechnische Instrumentarium erweitert sich gewaltig; nichtlineare, adaptive und optimierende Verfahren, die vorher am Aufwand scheiterten, werden nun praktikabel. Die Kombination von niedrigen Gerätekosten und programmtechnischer Flexibilität gestattet eine Autonomisierung einzelner Teilfunktionen, wie dies mit zentralen Prozeßrechnern aus Kosten- und Zuverlässigkeitsgründen, aber auch wegen der unübersichtlichen Programmierung nicht erreichbar war. Bei Anwendungen, die ein hohes Maß an Zuverlässigkeit erfordern, zum Beispiel Verkehrssteuerungen, wird der hohe Aufwand für Redundanz gesenkt.

Als Beispiel für die durch Mikrorechner geschaffene funktionelle Freizügigkeit ist in **Bild 7** die zweiachsige Lageregelung eines Roboters dargestellt [15]. Es sei angenommen, daß das Gerät einschließlich Meßwerterfassung in Polarkoordinaten arbeitet, während die Führungsgrößen in einem raumfesten Koordinatensystem rechtwinklig vorgegeben werden sollen. Die beiden Stellantriebe (r, φ) erhalten zunächst innere Stromregelungen, so daß, mit einer geringen Verzögerungszeit von beispielsweise 2 ms, praktisch eingepreßte Antriebskräfte (f_a, m_a) zur Verfügung stehen. Anschließend vollzieht sich die Aufhebung der kinematischen Kopplungen zwischen den Achsen (Zentrifugal- und Coriolis-Beschleunigung), die bei schnellen Bewegungen und Leichtbau des Gerätes störend wären; \dot{M} ist dabei ein Meß- oder Schätzwert der veränderlichen Lastmasse. Die so entkoppelte Strecke wird durch eine polare Lageregelung (r, φ)_{soll} mit Vorsteuerung der Geschwindigkeitsregler ($\dot{r}, \dot{\varphi}$)_{soll} ergänzt; dem schließt sich die Erzeugung der polaren Führungsgrößen aus den Vorgabewerten in kartesischen Koordinaten (x, \dot{x}, y, \dot{y}) an.

Die in **Bild 7** dargestellte Signalverarbeitung bis hin zur Erzeugung der Antriebsollwerte

$$(f_a, m_a)_{\text{soll}}$$

ist charakteristisch für Aufgaben, die mit einer Abtastzeit von rund 1 ms in einem neueren Mikrorechner bearbeitet werden können.

4 Gleichstrom-Regelantriebe

Geregelte elektrische Antriebe werden heute weit überwiegend mit stromrich-

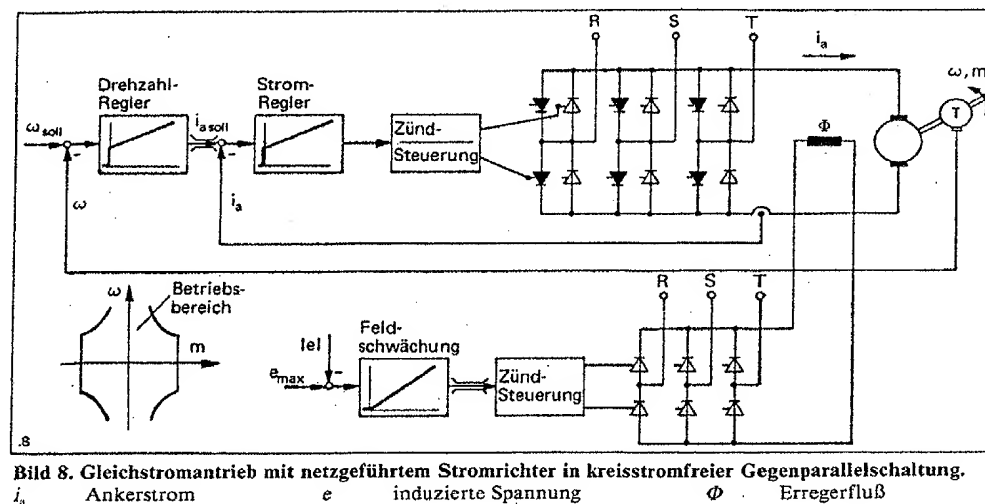


Bild 8. Gleichstromantrieb mit netzgeführtem Stromrichter in kreisstromfreier Gegenparallelschaltung.
 i_a Ankerstrom e induzierte Spannung Φ Erregerfluß

tergespeisten Gleichstrommaschinen ausgerüstet. Sie haben bei annehmbaren Kosten sehr gute Betriebseigenschaften in allen Quadranten der Drehzahl-Drehmoment-Ebene. Die Entkopplung der Hauptachsen macht die Gleichstrommaschine zu einer ideal einfachen Regelstrecke.

Als Stromrichter kommen bei kleinen Leistungen Schalttransistoren mit hoher Schaltfrequenz (> 10 kHz) zum Einsatz, die sich vor allem für die Speisung von Stellantrieben mit hohen dynamischen Anforderungen eignen. Netzgeführte Thyristor-Stromrichter sind bis zu beliebigen Leistungen ausführbar. **Bild 8** zeigt die Prinzipschaltung eines Gleichstromantriebs mit sechspulsiger Stromrichterschaltung. Die Aufgabe der Drehmomentregelung gemäß **Bild 6** übernimmt hier ein Stromregelkreis, der gleichzeitig eine Schutzfunktion für Antrieb und Last ausübt. Mit Mikrorechnern lassen sich künftig auch Zusatzfunktionen, zum Beispiel eine adaptive Stromregelung bei lückendem Strom, kostengünstig verwirklichen [11].

Bei kleinen Leistungen gelangen zunehmend Motoren mit Permanentmagneten zur Anwendung, die keine Erregerwicklung benötigen, gleichzeitig allerdings auch nicht die Möglichkeit bieten, die Drehzahl durch Feldschwächung zu steigern. Für Vorschubantriebe haben sich zwei Sonderbauformen mit minimaler mechanischer Zeitkonstante herausgebildet, und zwar der eisenlose kurze Scheibenläufermotor mit axialem und der eisenbehaftete schlanke Trommeläufer mit radialem Magnetfeld. Bei geeigneter Regelung haben beide Motoren vergleichbare dynamische Eigenschaften.

Trotz der unbestreitbaren Vorzüge des Gleichstromantriebs machen sich die Einsatzbeschränkungen durch den mechanischen Kommutator oft störend bemerkbar: Diese betreffen die

- Leistungs- und Drehzahlgrenzen, die
- zusätzliche Baulänge (Bahnantriebe) und das vergrößerte Trägheitsmoment (Scherenantrieb), den
- Betrieb in aggressiver oder explosibler Atmosphäre sowie den
- Verschleiß und die Wartung.

Diese Gesichtspunkte waren ausschlaggebend für einen starken Anreiz, die mechanisch einfacheren und robusteren Drehstrommotoren zu Regelantrieben weiterzuentwickeln. Bei solchen Motoren vollzieht sich die Stromwendung – nicht wie bei Gleichstrommotoren im Kommutator sondern – in einem ruhenden Wechselrichter mit Halbleiterschaltern.

5 Drehstrom-Regelantriebe

Als Drehstrommotoren kommen im wesentlichen zwei Bauformen in Frage: Stromrichter gespeiste Synchron- und Asynchronmotoren.

5.1 Regelung von Drehstrom-Synchronmotoren

Bei Speisung mit variabler Frequenz ist die Drehzahl bis zum Stillstand kontinuierlich steuerbar. Synchronmaschinen bieten vor allem bei großen Leistungen (> 1 MW) günstige Lösungen, da sie wegen der durch das Polrad induzierten Spannungen nur Stromrichter mit natürlicher Kommutierung erfordern. Dies

gilt sowohl für den im Abschnitt 5.2 erwähnten Direktumrichter als auch den Strom-Zwischenkreis-Umrichter. Anwendungen betreffen zum Beispiel Speisepumpenmotoren oder getriebelose Antriebe mit niedriger Drehzahl für Zementdrehöfen, Rohrmühlen oder Walzwerke. Durch zusätzliche Maßnahmen kann auf Schleifringe zur Speisung der Feldwicklung verzichtet werden [16; 17].

Mit Permanent-Erregung sind auch kleine Synchronmotoren mit Transistor-speisung, zum Beispiel als Stellantriebe, interessant; die jetzt verfügbaren, freilich noch teuren, Selten-Erde-Magnete werden hier weitere Fortschritte bringen [18; 19]. Die komplizierte Regelung einer Synchronmaschine läßt sich vorteilhaft mit einem Mikrorechner beherrschen [18; 20].

5.2 Regelung von Drehstrom-Asynchronmotoren

Diese Maschine zeichnet sich bei Verwendung eines Kurzschlußläufers durch ihre denkbar einfache und robuste Konstruktion, ihre kurze Baulänge und ihr kleines Trägheitsmoment aus. Sie ist bei direkter Netzspeisung die am weitesten verbreitete, allerdings nicht verlustarm regelbare, elektrische Antriebsmaschine. Dem Einsatz des Asynchronmotors in einem Drehstrom-Regelantrieb stehen – der aufwendige Umrichter und die – komplizierte regelungstechnische Struktur des Motors als Hindernisse im Wege.

Eine Asynchronmaschine ist eine nichtlineare Mehrgrößen-Regelstrecke, bei der wichtige Größen (die Rotorströme) einer Messung nicht zugänglich sind. Mit den Hilfsmitteln der Mikroelektronik gelingt es jedoch, die regelungstechnischen Probleme auch hier wirtschaftlich zu lösen.

Die Merkmale, durch die sich die Regelung eines Gleichstrommotors und die eines Drehstrommotors voneinander unterscheiden, lassen sich an Hand der mechanischen Analogien nach Bild 9 verdeutlichen. Eine Scheibe soll durch die Tangentialkraft f_T angetrieben werden, die an dem in einer radialen Führung gelagerten Zapfen Z angreift. Das Verstellen des Zapfens geschieht beim Antrieb nach Bild 9.1 durch die Radialkraft f_R , der eine Zugfeder entgegenwirkt; die Radialbewegung von Z wird durch geschwindigkeitsabhängige Reibungskräfte verzögert.

Tabelle 1. Mechanisch-elektrische Analogien.

Mechanisches Modell	Gleichstrommaschine
Antriebsdrehmoment: $m_a = R f_T$	Antriebsdrehmoment: $m_a \sim \Phi i_a$
Tangentialgeschwindigkeit: $v = R \omega$	induzierte Spannung: $e \sim \Phi \omega$
Leistung: $p = v f_T = R f_T \omega$	Leistung: $p = e i_a = \Phi i_a \omega$
Radialbewegung: $K_R dR/dt + K_F R = f_R$	Feldsteuerung: $T_e d\Phi/dt + \Phi = K u_e$

Zwischen einer Gleichstrommaschine und dem mechanischen Modell gemäß Bild 9.1 bestehen die Analogien nach Tabelle 1, wenn man in der Differentialgleichung für die Radialbewegung die Proportionalitätsfaktoren der Kraftkomponenten mit K_R und K_F und in der Differentialgleichung für die Feldsteuerung den Proportionalitätsfaktor der zeitlichen Ableitung des magnetischen Flusses Φ mit T_e sowie den Proportionalitätsfaktor der elektrischen Spannung u_e mit K bezeichnet. Danach sind die folgenden Größen einander analog:

$$R \sim \Phi, f_T \sim i_a, v \sim e, f_R \sim u_e, \omega = \omega.$$

Der Erzeugung von Tangential- und Radialkräften im mechanischen Modell entspricht bei der Gleichstrommaschine somit die entkoppelte Steuerung im Anker- und Feldkreis. Auch die Feldschwächung wird im Modell richtig wiedergegeben.

Im Fall des Drehstrom-Modells, Bild 9.2, ist die Steuerung erheblich schwieriger. Hier soll sich der Antrieb des Zapfens über Zug- oder Druckkräfte in drei raumfesten Richtungen vollziehen; bei rotierender Scheibe sind also drei nach Betrag, Frequenz und Phasenlage steuerbare Wechselkräfte zu erzeugen. Das Problem läßt sich durch eine Koordinatentransformation lösen, indem man zu-

nächst die benötigten resultierenden Radial- und Tangentialkräfte berechnet und daraus unter Berücksichtigung der augenblicklichen Lage des Zapfens die erforderlichen Steuerkräfte f_1 , f_2 und f_3 bestimmt. Dieser Gedanke liegt dem von F. Blaschke [21] vorgeschlagenen Verfahren der Feldorientierung bei Drehstrommaschinen zugrunde. Die Position des Zapfens Z entspricht dabei der Fluß-Grundwelle nach Betrag und Phase, die drei Kräfte sind den Strömen in den raumfesten Ständerwicklungen analog. Da die Rotorströme von außen nicht erfaßbar sind, muß ihre Wirkung auf die Flußwelle durch Messung im Ständer der Maschine oder durch Rechnung mit einem dynamischen Maschinenmodell bestimmt werden. Diese umfangreiche Meßwertverarbeitung und die Koordinatentransformation lassen sich erst mit Mikrorechnern kostengünstig beherrschen.

Als Stromrichter zur Speisung drehzahlvariabler Drehstrommotoren stehen verschiedene Grundschaltungen zur Verfügung:

- Direktumrichter zur unmittelbaren Erzeugung eines frequenzvariablen Drehstromsystems aus einem Drehstromnetz konstanter Frequenz. Dieser Umrichter eignet sich für Synchron- und Asynchronmaschinen

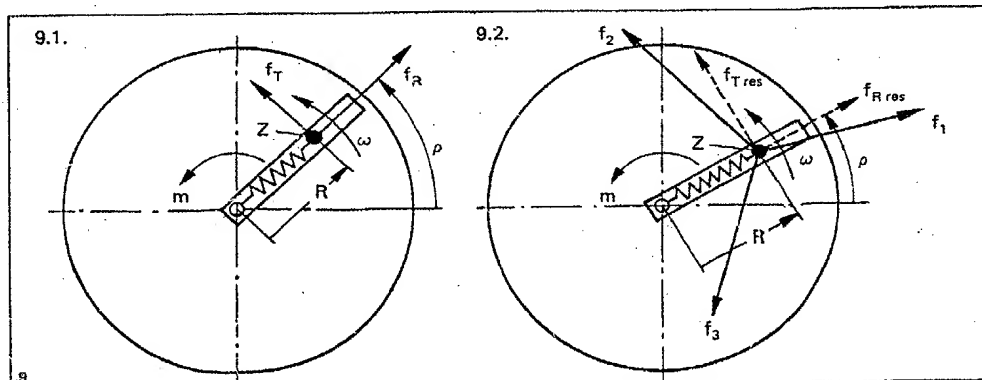


Bild 9. Mechanische Modelle elektrischer Antriebe.

Bild 9.1. Gleichstromantrieb.

Bild 9.2. Drehstromantrieb.

Elektrische Regelantriebe für den Maschinenbau

großer Leistung; allerdings ist die Ausgangsfrequenz auf etwa $\frac{1}{3}$ der Frequenz des speisenden Netzes beschränkt [13].

- Transistor-Wechselrichter kleiner Leistung mit Gleichspannungs-Zwischenkreis zur Entkopplung des Wechselrichters vom speisenden Netz, Bild 10. Die hohe Schaltfrequenz bietet sehr gute dynamische Eigenschaften. Eine Wechselstrom-Regelung führt auf eingeprägte nahezu sinusförmige Ständerströme; die regelungstechnische Struktur der Asynchronmaschine wird durch die Strom-einprägung wesentlich vereinfacht.
- Thyristor-Umrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis für höhere Leistungen. Wegen der reduzierten Schaltfrequenz ist eine Wechselstromregelung der Ständerströme nicht mehr möglich; die Kurvenform der Ströme ist im oberen Drehzahlbereich stark verzerrt. Dieses Umrichterprinzip wird zum Beispiel bei den 1,4-MW-Asynchronmotoren der Lokomotiv-Baureihe 120 der Deutschen Bundesbahn eingesetzt [22].
- Thyristor-Umrichter mit Strom-Zwischenkreis. Diese Schaltung erfordert einen etwas geringeren Aufwand an Thyristoren, jedoch weichen die Ströme noch stärker von der Sinusform ab. Der infolge der Kurvenform unruhige Lauf bei niedriger Drehzahl läßt sich durch Takten verbessern. Stromrichter dieser Art werden zum Beispiel bei Nahverkehrs-Fahrzeugen verwendet [23].

Von den genannten Umrichterschaltungen gibt es zahllose Varianten, die zum Aufbau von Drehstrom-Regelantrieben mit Synchron- oder Asynchronmotoren geeignet sind; eine schaltungs-

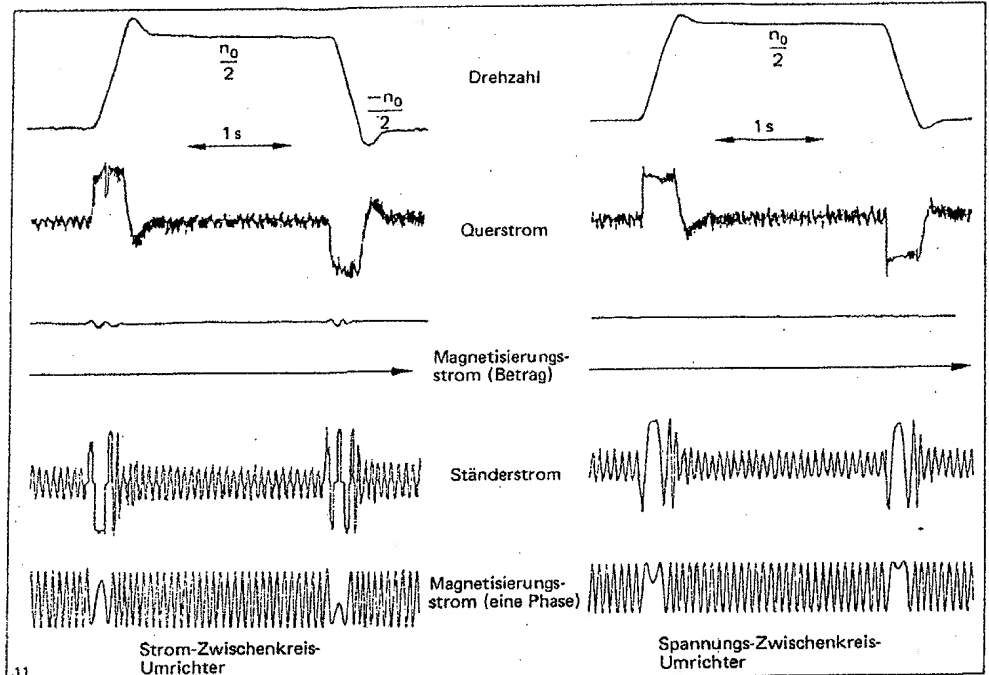


Bild 11. Regelung eines 22 kW-Asynchronmotors in Feldkoordinaten mit Mikrorechner.

mäßige Konsolidierung für verschiedene Anwendungsgebiete ist noch nicht erfolgt.

An Hand von Versuchsantrieben konnte gezeigt werden, daß bei Einsatz von Mikrorechnern für die Signalverarbeitung und Regelung mit allen Umrichtern ein dynamisches Verhalten erreichbar ist, wie man es von stromrichter gespeisten Gleichstrommaschinen kennt. Auch lagegezielte Stellantriebe, die im Stillstand mit Drehmoment belastet werden, lassen sich mit stromrichter gespeisten Drehstrommotoren verwirklichen [24 bis 26].

Zum Vergleich sind in Bild 11 gemessene Reversiervorgänge eines 22-kW-Drehstromantriebes mit zwei Thyristor-

umrichtern und Mikrorechner-Regelung gezeigt; der Motor war dabei mit einer leerlaufenden 40-kW-Gleichstrommaschine gekoppelt. Die Regelzeit für das Drehmoment (Querstrom) liegt unter 10 ms; dies entspricht dem bei einer Gleichstrommaschine mit einem 6pulsigen Stromrichter erreichbaren Wert [26].

Wegen der schnellen Evolution sowohl der Mikro- als auch der Leistungselektronik wird es noch einige Zeit dauern, bis das Gebiet sich hinreichend stabilisiert hat, um Drehstrom-Regelantriebe auf breiter Basis in die Praxis einführen zu können. Es besteht aber kein Zweifel, daß die Entwicklung in diese Richtung fortschreiten wird.

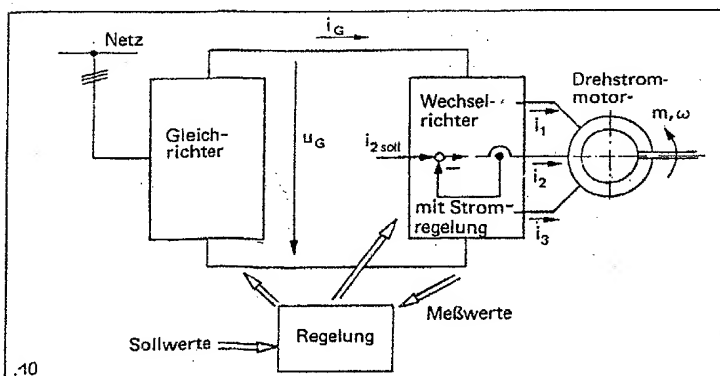


Bild 10. Drehstrom-Regelantrieb mit Zwischenkreis-Umrichter und Ständerstrom-Regelung.
 i_G Zwischenkreisstrom
 u_G Zwischenkreisspannung

6 Meßgrößenrekonstruktion, adaptive und selbsteinstellende Regelung

Im Abschnitt 2 wurde auf die ausgeprägte Variabilität mancher Antriebsregelstrecken hingewiesen, die den Betrieb mit einer festen Reglereinstellung erschweren kann. Angesichts der erörterten Möglichkeiten, welche die Mikroelektronik bietet, stellt sich die Frage, ob künftig bei tragbarem Aufwand adaptive und selbsteinstellende Regler verwirklicht werden können. Die Aussichten auf

eine befriedigende Lösung dieses seit langem diskutierten Problems sind mit der Verfügbarkeit des Mikrorechners in der Tat sehr viel besser geworden. Bei Antriebsregelstrecken laufen zwar – im Gegensatz zu verfahrenstechnischen Regelstrecken – die Vorgänge sehr schnell ab, jedoch ist die dynamische Struktur der Strecke im wesentlichen bekannt, wie in Bild 5 am Beispiel des Haspels gezeigt. Es kommt also nur darauf an, die jeweils gültigen Parameter zu identifizieren. Möglich ist dies zum Beispiel durch Nachbilden der Regelstrecke im Mikrorechner und durch Berechnen der Reaktionen auf meßbare Eingangsgrößen der Strecke, um sie mit den gemessenen Ausgangsgrößen der Strecke zu vergleichen. Da das Modell nicht genau der Strecke entspricht und auch den unbekannten Störungen nicht ausgesetzt ist, entsteht eine Fehlergröße, deren Verlauf zur Nachführung des Modells genutzt werden kann. Hierfür gibt es zahlreiche mathematische Strategien – zum Beispiel Korrelation, Regression, Gradientenverfahren –, die hier nicht näher beschrie-

ben werden können [27 bis 32]. Sie alle erfordern einen erheblichen Rechenaufwand, der in der verfügbaren Zeitspanne nur von leistungsfähigen Mikrorechnern bewältigt werden kann; hier gibt es ermutigende erste Ergebnisse.

Dem der Strecke nachgeführten Modell lassen sich nun Schätzwerte aller jener Größen entnehmen, die einer unmittelbaren Messung nicht zugänglich sind. Es kann sich dabei sowohl um Variable handeln, die dem Regler korrigierend aufgeschaltet werden, als auch um veränderliche Parameter der Regelstrecke, etwa Steifigkeiten oder Trägheitsmomente, deren Kenntnis es gestattet, die Parameter des Reglers im Sinne eines verbesserten Regelverhaltens nachzustellen. Im ersten Fall spricht man von Meßgrößenrekonstruktion durch Beobachter, im anderen von adaptiver Regelung. Eine wesentliche Erleichterung gegenüber früheren Versuchen ist darin zu sehen, daß die Regel-, Identifizierungs- und Adaptionsprogramme in ein und demselben Mikrorechner ablaufen; falls notwendig, ist die Arbeit auf mehrere

Prozessoren mit einem gemeinsamen Datenkanal zu verteilen.

In Bild 12 ist das Prinzip einer Meßgrößenrekonstruktion und Parameteradaptation am Beispiel einer Trommel-Fördermaschine angedeutet.

Die zunehmende Verarbeitungskapazität der Mikroelektronik läßt sich für übergeordnete Optimierungsaufgaben auch dadurch nutzen, daß man den Mikrorechner veranlaßt, bei einer unbekannten, aber als einigermaßen linear anzunehmenden Regelstrecke selbst eine günstige Reglereinstellung zu finden. Um die bei automatischen Experimenten an einer praktischen Regelstrecke möglichen Gefahren – zum Beispiel Überbeanspruchung des Stellglieds oder des Antriebs – zu reduzieren, muß vorausgesetzt werden, daß bei Beginn der Versuche bereits ein funktionsfähiger und begrenzbarer Basisregler vorhanden ist, bei elektrischen Antrieben etwa in Form einer Strom- oder Drehmomentregelung unter Einschluß des Leistungstellglieds. Da bei der Suche nach geeigneten Reglerparametern Fehleinstellungen,

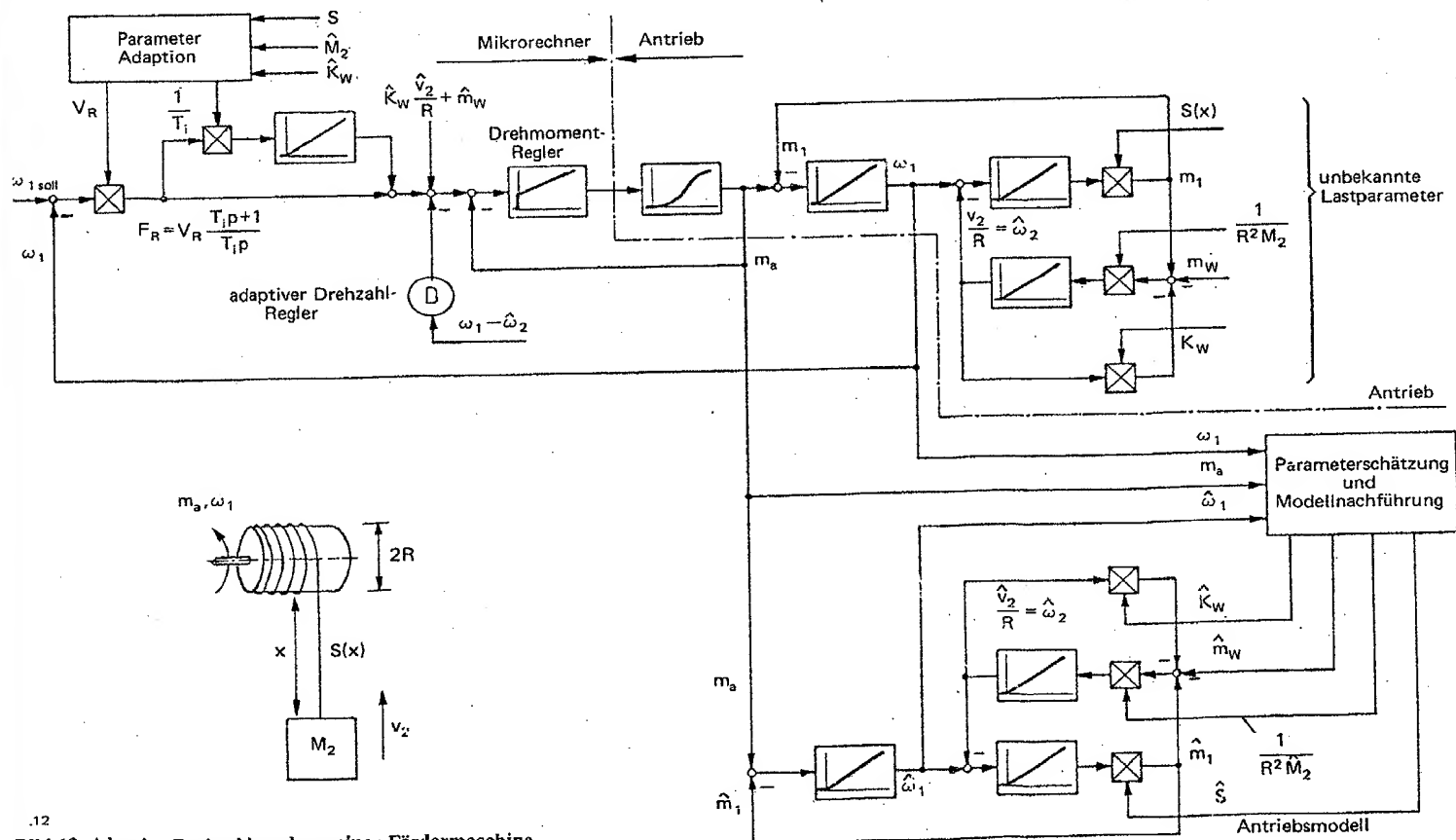


Bild 12. Adaptive Drehzahlregelung einer Fördermaschine.

S	Federkonstante des Förderseils	m_w	Widerstands-Drehmoment
M_2	Lastmasse	\hat{v}_2	Geschwindigkeit des Förderkorbes
k_w	Reibungskoeffizient	V_R, T_i	Parameter des Drehzahlreglers

Elektrische Regelantriebe für den Maschinenbau

die zu einer Instabilität führen, nicht auszuschließen sind, ist es zweckmäßig, die Strecke nur kurzzeitig bei kleiner Amplitude zu aktivieren und den eigentlichen Suchvorgang als Simulation im Mikrorechner ablaufen zu lassen. Die Parametersuche sollte also nicht mit der wirklichen Strecke erfolgen, jedenfalls nicht, solange die Reglereinstellung noch in weiten Bereichen veränderlich ist. Als Kriterium für den Suchvorgang muß eine geeignete Kostenfunktion auf der Basis des Fehlers zwischen Simulationsergebnis und der als Ziel vorgegebenen Bezugs-Testantwort des geschlossenen Kreises definiert werden.

An Hand einer hydraulischen Materialprüfmaschine und eines elektrischen Laborantriebs wurde das skizzierte Verfahren einer selbsteinstellenden Regelung verwirklicht. Die Versuchsschritte

- Messung des Streckenverhaltens
- Parametersuche
- Regelung der Strecke

werden dabei vom Mikrorechner gesteuert [33]. Mit einem handelsüblichen Mikrorechner dauert die Parametersuche etwa 20 s; der Bedienungsmann kann das Ergebnis überprüfen und die Freigabe der Regelung veranlassen beziehungsweise einen neuen Suchlauf mit abgeänderter Bezugsfunktion starten.

Falls sich bei den weiteren Untersuchungen zeigt, daß das Verfahren auch bei anderen Regelstrecken und Reglerstrukturen anwendbar ist, wäre gleichzeitig ein Weg gefunden, um die Inbetriebnahme von Mikrorechnerregelungen zu erleichtern. Die Arbeiten befinden sich in einem frühen Stadium; bis zu einer praktischen Anwendung sind noch zahlreiche Probleme zu überwinden.

Diese Untersuchungen zeigen, daß mit dem Vordringen der Mikroelektronik auch für die Regelungstechnik eine neue Evolutionsphase begonnen hat, in der sich die Gewichte von der eigentlichen Regelung auf die selbsttätige Durchführung von Koordinations-, Adaptions- und Optimierungsaufgaben verschieben. Vielleicht wird dieser Übergang später als Anfang einer weiteren industriellen Revolution identifiziert.

Schrifttum

- [1] Leonhard, A.: Elektrische Antriebe. Enke 1959.
- [2] Volk, P.: Antriebstechnik in der Metallverarbeitung. Springer 1966.
- [3] Kümmel, F.: Elektrische Antriebstechnik. Springer 1971.
- [4] Pfaff, G.: Regelung elektrischer Antriebe. Oldenbourg 1971.
- [5] Leonhard, W.: Regelung in der elektrischen Antriebstechnik. Teubner 1974.
- [6] Bühler, H.: Einführung in die Theorie geregelter Drehstromantriebe. Birkhäuser 1977.
- [7] Raatz, E.: Regelung von Antrieben mit elastischer Verbindung zur Arbeitsmaschine. ETZ-A (1971) S. 211.
- [8] Böhm, E.: Führung und Regelung von Antennenantrieben für Satelliten-Bodenstationen. Siemens-Z. (1974) S. 828.
- [9] Keßler, G.: Das zeitliche Verhalten einer kontinuierlichen elastischen Bahn zwischen aufeinanderfolgenden Walzenpaaren. Regelungstechnik (1960) S. 436 u. (1961) S. 154.
- [10] Senger, K.: Vollelektronische Haspelregelung. Techn. Mitt. AEG-Telefunken (1970) S. 383.
- [11] Leonhard, W.: Mikrorechner in der elektrischen Antriebstechnik. In: Fachberichte INTERKAMA-Kongreß 1980. Springer 1980, S. 637.
- [12] Syrbe, M.: Vermaschte Regelkreise, eine Möglichkeit zur Vereinfachung von Regelaufgaben. Heidelberger Tagung Regelungstechnik 1956. Oldenbourg 1957, S. 78.
- [13] Möltgen, G.: Netzgeführte Stromrichter mit Thyristoren. Siemens-Fachbuch 1974.
- [14] Jötten, R.: Leistungselektronik, Bd. 1. Vieweg 1977.
- [15] Freund, E., u. H. Hoyer: Das Prinzip nichtlinearer Systementkopplung mit der Anwendung auf Industrieroboter. Regelungstechnik (1980) S. 80.
- [16] Götz, G., u. P. Gumbrecht: Umrichter gespeiste Synchronmaschinen. AEG-Mitt. (1973) S. 141.
- [17] Stemmler, H.: Speisung einer langsamlaufenden Synchronmaschine mit einem direkten Umrichter. Ber. VDE-Fachtagung Elektronik (1969) S. 177.
- [18] Claussen, U.: Inverses Modell zur Linearisierung und Entkopplung in Antriebsregelkreisen. Regelungstechnik (1979) S. 349.
- [19] Grotstollen, H., u. G. Pfaff: Bürstenloser Drehstrom-Servoantrieb mit Erregung durch Dauermagnete. ETZ (1979) S. 1382.
- [20] Richter, W.: Microprocessor Controlled Inverter-Fed Synchronous Motor Drive. IEE Conference on Electrical Variable-Speed Drives; London 1979, S. 161.
- [21] Blaschke, F.: Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Asynchronmaschine. Siemens Forschungs- und Entwicklungsberichte (1972) S. 184.
- [22] Güthlein, H.: Die neue elektrische Lokomotive 120 der Deutschen Bundesbahn in Drehstrom-Antriebstechnik. Elektrische Bahnen (1979) Nr. 9 u. 10.
- [23] Waidmann, W.: Drehstromantrieb für Gleichstrombahnen. Siemens-Z. (1976) S. 493.
- [24] Gabriel, R., W. Leonhard u. C. Nordby: Regelung der stromrichter gespeisten Drehstrom-Asynchronmaschine mit einem Mikrorechner. Regelungstechnik (1979) S. 379.
- [25] Boehringer, A., G. Stute, C. Ruppmann, G. Vogt u. R. Würslin: Entwicklung eines drehzahl geregelten Asynchronmaschinenantriebs für Werkzeugmaschinen. wt, Zeitschrift für industrielle Fertigung (1979) S. 463.
- [26] Gabriel, R.: Mikrorechner geregelte Asynchronmaschine mit Strom-Zwischenkreis-Umrichter. 4. Leistungselektronik Konferenz, Budapest 1981.
- [27] Weber, W.: Adaptive Regelungssysteme. Oldenbourg 1971.
- [28] Speth, W.: Adaptive Regelsysteme in der Antriebstechnik, Dissertation TU Braunschweig 1971.
- [29] Weihrich, G.: Drehzahlregelung von Gleichstromantrieben unter Verwendung eines Zustands- und Störgrößen-Beobachters. Regelungstechnik (1978) S. 349.
- [30] Waschatz, U.: Adaptive Regelung von elektrischen Antrieben mit Mikrorechner. Intern. DFG-Berichte 1980.
- [31] Isermann, R.: Experimentelle Analyse der Dynamik von Regelsystemen. Bibl. Inst. 1971 u. 1972.
- [32] Leonhard, W.: Statistische Analyse linearer Regelsysteme. Teubner 1973.
- [33] Fromme, G.: Einsatz eines Mikrorechners als selbstoptimierender Regler für Strecken mit absatzweise konstanten Parametern. 4. Leistungselektronik Konferenz, Budapest 1981.

A 29 380